Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen.

Von der Technischen Hochschule
zu Breslau
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte
Dissertation.

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Alfred Schneider
aus Gleiwitz OS.

Referent: Prof. Dr.-Ing. E. h. W. Tafel.
Korreferent: Prof. E. Diepschlag.

Tag der mündlichen Prüfung: 3. November 1928.

Spezialdruckerei für Dissertationen Dr. H. Eschenhagen Kdt.-Ges., Ohlau in Schlesien

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Die vorliegende Dissertation stützt sich auf die Arbeit von Hanemann und Lucke über „Die Rekristallisation nach Warmverformung" (Stahl und Eisen 1925, Nr. 28, S. 1117). Die metallographischen Untersuchungen sind auf Veranlassung von Herrn Professor Dr.-Ing. E. h. Wilhelm Tafel, Breslau, in Fühlung mit Herrn Professor Dr.-Ing. Hanemann, Charlottenburg, und zum größten Teil in dessen Institut durchgeführt worden.

Es ist mir ein Bedürfnis, Herrn Professor Dr.-Ing. Hanemann für seine Unterstützung und seinen wertvollen Rat ergebensten Dank zu sagen.

Meinem sehr verehrten Lehrer, Herrn Professor Dr.-Ing. E. h. Wilhelm Tafel verdanke ich die Anregung zu dieser Arbeit; ich spreche ihm sowohl hierfür wie für die Ratschläge bei ihrer Anfertigung meinen besten Dank aus.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548228_0001

Inhalt:

A. Einleitung:
Der Bedeutung der Korngröße für die mechanischen Eigenschaften eines Metalles 1

B. I. Der Materialfluß beim Warmwalzen 4

II. Der Einfluß der Ausgangskorngröße auf den Verlauf der Rekristallisation 8

III. Die Abhängigkeit der Korngröße von Walzdruck und Walztemperatur, an durchgewalzten Stäben gemessen:

1. Walztemperatur 1000°C 11
2. „ 925°C 12
3. „ 850°C Stabmitte 12
„ „ Stabrand 13

IV. Die Abhängigkeit der Korngröße von Walzdruck und Walztemperatur in der Mitte von Uebergängen gemessen:

1. Walztemperatur 1000°C 14
2. „ 1200°C 16
3. „ 1100°C 18
4. „ 925°C 18
5. „ 850°C 18
6. „ 750°C 18
7. „ 700°C 20
8. „ 680°C 20

V. Der Verlauf der Rekristallisation am Rande eines Ueberganges . 22

VI. Der Einfluß der Anfangshöhe auf den Verlauf der Rekristallisation 23

VII. Die Vorgänge bei der Rekristallisation 24

VIII. Nutzanwendung der Rekristallisationsdiagramme 29

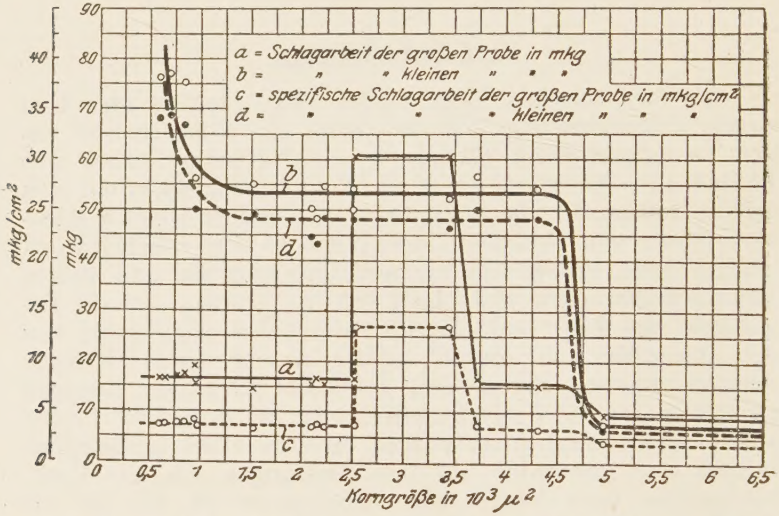
C. Zusammenfassung 30

A. Einleitung.

Die mechanischen Eigenschaften eines Metalles stehen in engem Zusammenhange mit der Größe des Kristallkornes, aus dem es aufgebaut ist. Hanemann und Hinzmann[1] haben den Einfluß der Korngröße auf die Festigkeitseigenschaften von Stählen untersucht. Sie erzeugten durch Glühen eines Kohlenstoffstahles von 0,12% C im γ-Gebiet bei verschiedenen Temperaturen Proben mit wechselnder Korngröße und stellten ihre Zerreißfestigkeit und Härte fest. Sie fanden, daß die Ergebnisse des Zug- und Kugeldruckversuches unabhängig von der Korngröße sind, obwohl letztere in sehr weiten Grenzen, nämlich zwischen 600 μ^2 und 13000 μ^2 schwankte. Dagegen ermittelten sie bei Kerbschlagversuchen, bei denen die Probestücke verschiedene Abmessungen besaßen, einen bedeutenden Einfluß der Korngröße auf ihre Messungen. Da die Kerbschlagprobe nach Moser[2] eine Arbeitsprobe ist, bei der die 3 Faktoren: Stoff, Form und Verformungsgeschwindigkeit zum Ausdruck kommen, gewinnen diese Versuche eine ganz besondere Bedeutung für den Zusammenhang der Korngröße und der mechanischen Eigenschaften eines Metalles. Die Abhängigkeit der spezifischen Kerbzähigkeit, als Quotient aus Gesamtschlagarbeit und Schlagquerschnitt in mkg/cm² gemessen, und der Schlagarbeit (mkg) bei der großen Probe von 30×15 mm² Querschnitt und der kleinen Probe von 15×15 mm² Querschnitt von der Korngröße zeigt Abb. 1. Danach sinkt die spezifische Kerbzähigkeit der kleinen Probe zunächst mit wachsender Korngröße bis auf etwa 24 mkg/cm² herab, bleibt bis zu 4500 μ^2 bei diesem Wert konstant und fällt danach auf 3—4 mkg/cm² herab. Die Kurve der Raumschlagarbeit, — die mittlere Raumschlagarbeit ist der Quotient aus Schlagarbeit und Fließraum, — hat einen ähnlichen Verlauf. Die Kerbzähigkeit der großen Probe beträgt bis zu einer Korngröße von 2500 μ^2 konstant etwa 3 mkg/cm², erreicht bei 2500 μ^2 den Wert von

1) Die Zahlen hinter Namen beziehen sich auf das Literaturverzeichnis auf S. 52.

13 mkg/cm², um bei 3 500 μ² wieder auf einen sehr niedrigen Wert zu sinken. Der unregelmäßige Verlauf dieser Kurven liegt in der von Schüle[3] und Moser[2] zuerst gemachten Feststellung,



Beziehung zwischen Korngröße und Kerbzähigkeit beim C-Stahl. Abb. 1.

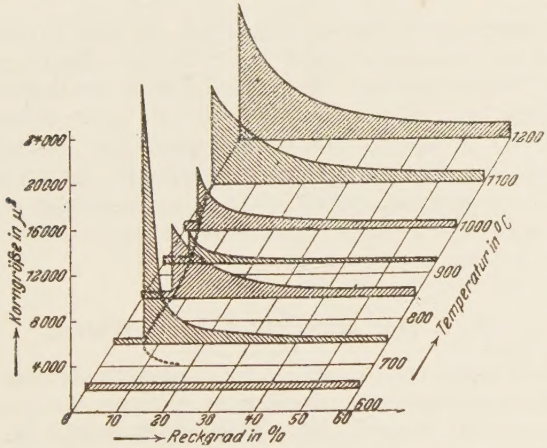
daß die beim Kerbschlagversuch aufgezehrte Arbeit nicht vom Schlagquerschnitt, sondern von einem Fließraum aufgenommen wird. Die Größe des Fließraumes ist abhängig von der Geschwindigkeit, mit der der Pendelhammer die aufzunehmende Arbeit an die Probe heranbringt; sie ist also ein Maßstab für die Schnelligkeit, mit welcher der Werkstoff seine Form ändert und Arbeit aufnimmt. Hanemann und Hinzmann haben bei ihren Versuchen festgestellt, daß diese Formänderungs- oder Arbeitsschnelligkeit von der Korngröße abhängig ist, daß sie bei kleinstem Korn den niedrigsten Wert und bei 1000—4000 μ² ein Maximum besitzt.

Ferner fanden sie, daß die mittlere Raumschlagarbeit, gemessen als Quotient aus Schlagarbeit und Fließraum in mkg/cm³, mit steigender Korngröße sinkt, bis sie bei einer Korngröße von 4 500 μ² sprungartig von 8 250 mkg/cm³ auf 3000 mkg/cm³, also auf ein Drittel ihres Anfangswertes fällt. Die Kurven geben an, in welcher Weise Arbeitsschnelligkeit und mittlere Raum-

schlagarbeit eines Stahles von der Korngröße abhängen. Da diese beiden Stoffeigenschaften ein Werkstück in seinem Verhalten gegenüber Geschwindigkeit und Menge der zugeführten Arbeit genau kennzeichnen, haben die Resultate obiger Versuche folgende Bedeutung: Sie gestatten, einem Werkstoff nur durch Veränderung der Korngröße eine bestimmte Formänderungsschnelligkeit und Arbeitsaufnahmefähigkeit zu geben und somit den Forderungen der Konstrukteure anzupassen.[1]

Es ist daher erklärlich, daß man seit jeher bestrebt ist, die Gesetze zu ergründen, nach welchen man bei Stahl und Schmiedeeisen eine bestimmte Korngröße erzielen kann. Der Erfolg dieser Bemühungen liegt darin, daß man folgende Maßnahmen zur Beeinflußung der Korngrößen kennen gelernt hat:

1. Glühen des warmverarbeiteten Eisens und Stahles.
2. Kaltverformung und nachfolgendes Glühen.
3. Verarbeitung bei hohen Temperaturen.



Rückkristallisation beiWarmverformung von Weicheisen, (nach Hanemann und Lucke). Abb. 2.

Den Einfluß der Glühtemperatur und -dauer auf die Korngröße und mechanischen Eigenschaften warmverarbeiteten Eisens haben Pomp, Campbell und Oberhoffer[1] eingehend untersucht, während die Abhängigkeit der Korngröße vom Grade der Kaltverformung und der nachfolgenden Glühtemperatur bei

1) Bei den folgenden Ausführungen ist angenommen, daß die genannte Abhängigkeit der Eigenschaften eines Metalls von der Korngröße auch gilt, wenn die Kornvergröberung durch Verformung statt Ueberhitzung herbeigeführt wird.

Eisen durch Oberhoffer und Jungbluth,[5] bei Kupfer durch Rassow-Velde,[6] bei Zinn durch Czochralski,[7] bei Aluminium durch Rassow-Velde geklärt ist. Die dritte Maßnahme zur Erzielung einer bestimmten Korngröße, nämlich die Verarbeitung bei hohen Temperaturen, ist erst in letzter Zeit Gegenstand größerer Untersuchungen geworden. Hanemann und Lucke[8] haben unter einem Fallhammer kleine zylindrische Proben von 8—10 mm ∅ aus Kupfer, Eisen und Stahl warm gestaucht und deren Korngröße gemessen. Sie fanden, daß beim Schmieden Verformungsgrad und Arbeitstemperatur die Korngröße des Werkstückes bestimmen, und daß die Abhängigkeit dieser 3 Größen voneinander gemäß den Kurven der Abb. 2 verläuft. Die Korngröße bleibt bis zu einem bestimmten Reckgrad — dem Schwellenwert — konstant, erreicht bei seiner Ueberschreitung durch Neubildung des Gefüges — Rekristallisation — einen hohen Wert und sinkt mit wachsendem Stauchgrad ab.

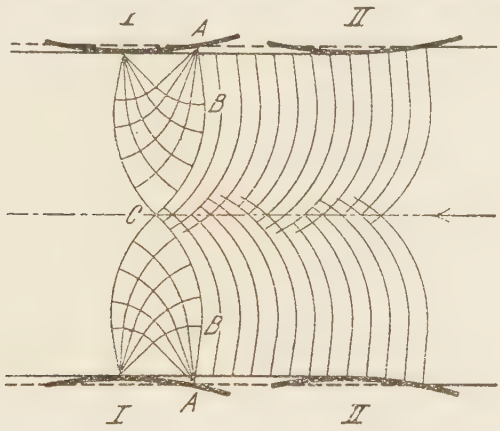
Bei dieser Arbeit trat die Frage auf, ob ihre Ergebnisse sich auch auf die Vorgänge beim Warmwalzen übertragen lassen, oder ob hierbei andere Gesetzmäßigkeiten vorliegen. Da der Materialfluß beim Walzen ein anderer als beim Schmieden ist, entstand das Problem, die Abhängigkeit der Korngröße von Walzdruck und Walztemperatur zu ermitteln. Zu seiner Lösung dient die vorliegende Arbeit. Sie hat mithin die Aufgabe, die Rekristallisation nach dem Warmwalzen zu untersuchen.

B. I. Der Materialfluß beim Walzen.

Das Walzen von Profil- oder Stabeisen erfolgt zwischen zwei sich gegeneinander drehenden Walzen bei einer Temperatur von 700—1200°C. Der Walzprozeß selbst ist eine Art Druckvorgang. Der Druck wird hierbei von den Oberflächen der Walzen ausgeübt, deren einzelne Punkte sich bei der Drehung der Stabachse nähern. Dadurch ist die Höhenverminderung nicht wie beim Pressen an jeder Stelle der Preßflächen gleich, sondern sie erreicht auf der Eintrittsseite des Gutes ein Maximum und sinkt in der Walzebene auf Null herab. Bei einem Stab von 30 mm Anfangshöhe, der zwischen 2 Walzen von 440 mm ∅ mit einer Geschwindigkeit von 4 m/sec. um 50% gedrückt wird, beträgt die Stauchgeschwin-

digkeit 1,04 m/sec.; bei 10% Druck fällt sie auf 0,2 m/sec. herab.

Beim Erfassen des Materials beginnt die erste plastische Verformung in den Stellen A A, von denen aus nach den Untersuchungen von Meyer und Nehl[10] sich Gleitschichten entsprechend Abb. 3 bilden. Die Formänderung geht in erster Linie in diesen Gleitschichten vor sich. Beim Durchgang durch die Walzen nimmt die Zahl der Fließlinien A,B,C mit steigendem Druck zu, während die übrigen weniger stark zum Ausdruck kommen. In der Mitte des Walzgutes gelangen beide Linien-

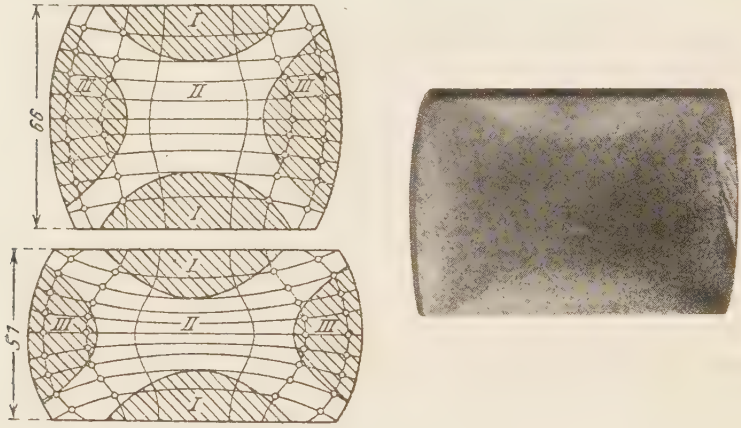


Schema der Gleitschichtenbildung beim Walzen.

(nach Siebel). Abb. 3.

scharen zur Berührung und rufen dort nach Siebel ein Maximum der Verformung hervor. Jedoch tritt zwischen Ein- und Austritt des Walzgutes eine Staukraft auf, die zuerst von Fink[11] in seiner Theorie der Walzarbeit festgestellt wurde. W. Tafel[9] hat an Hand von Berechnungen über die in die Walzen ein- und ausströmenden Volumina gefunden, daß die Walzen in der gleichen Zeit mehr Material in sich hineinziehen möchten, als sie beim Austritt freigeben. Da ein solcher Prozeß unmöglich ist, muß zwischen Ein- und Austritt des Walzgutes eine Staukraft auftreten, die sich in folgender Erscheinung auswirkt: Beim Greifen des Walzgutes drückt die Staukraft gegen das Material, sodaß es mit geringerer Geschwindigkeit als die Um-

fangsgeschwindigkeit in die Walzen eintritt. Beim Austritt drückt sie das Material rascher aus den Walzen, als es der Walzgeschwindigkeit entspricht. Die Lage des neutralen Querschnittes, der sich genau mit der Geschwindigkeit der Walzen bewegt, hängt von der Größe des Walzendurchmessers, der Anfangshöhe des Gutes und dem Druck ab. Die Ermittlung der plastischen Verformung eines Walzkörpers, im Längsschnitt betrachtet, stößt demnach auf außerordentliche Schwierigkeiten, die noch größer werden, sobald man die Beanspruchungsverhältnisse im Querschnitt hinzuzieht.



Zonenbildung beim Stauchversuch.

b nach Siebel.[17]) Abb. 4.

Bei sämtlichen nachstehend angeführten Versuchen trat folgende Erscheinung deutlich hervor. Die Reibung zwischen Walze und Walzgut hindert die obersten Schichten des Materials an einem gleichmäßigen Fließen, und es entstehen Bereiche behinderter Verformung, wie sie in Abb. 4 wiedergegeben sind. Die Formänderung geht nach Siebel am stärksten in der Zone II und in den nach den Ecken zu sich erstreckenden Ausläufern vor sich. Bei starkem Drücken führt dieser Prozeß zu einer Umlagerung des Materials, indem Teile, die ursprünglich an den Stabseiten lagen, auf die Oberfläche, also unter die Walzen gelangen, ein Vorgang, der sich rein äußerlich durch 2 einige mm

starke Streifungen an beiden Rändern der gedrückten Stabfläche kundtut.[1]

W. Tafel und G. Pajunk[12] haben versucht, die Fließvorgänge in den wagerechten Schichten von Walzkörpern dadurch zu erfassen, daß sie in das Material Drahtstifte in bestimmten Abständen einsetzten, und die Lage dieser Stifte vor und nach dem Walzen prüften. Sie fanden, daß die Breitung in den Berührungsflächen zwischen Walze und Walzgut von der Mitte aus zunächst linear verläuft, um am Rande sprunghaft zu sinken. In den Nachbarebenen der Berührungsflächen weist ihr Verlauf eine Zunahme an den Randzonen auf. Beide Erscheinungen gleichen sich aus, sodaß im Mittel die Breitung von der Stabachse nach dem Rande zu linear anwächst.

Das in der Höhe verdrängte Material fließt zum Teil in die Breite, zum Teil in die Länge des Stabes ab. Die Größe der Breitung und Längung hängt ab von dem Walzdruck, und der Walztemperatur, der Beschaffenheit des Materials, dem Durchmesser und der Geschwindigkeit der Walzen, der Anfangsbreite des Gutes und der Beschaffenheit der Walzenoberfläche; und zwar fließt umso mehr Material in die Breite, je weicher es ist, je höher der Druck und die Walzendurchmesser sind und je geringer Temperatur, Walzgeschwindigkeit, Anfangsbreite und Reibung an den Walzenoberflächen sind. Der gesamte Materialfluß ist also von einer Fülle von Faktoren abhängig, sodaß die Resultate aus den Untersuchungen von Geuze[13], Kirchberg[14], Falk[15], Sedlaczek[16], Siebel[17] über die Breitung nur Näherungswerte darstellen. Die heutige Kenntnis der plastischen Formänderung beim Walzen gestattet es nicht, vor dem Walzen genau die Abmessungen des Stabes nach dem Stich zu errechnen.

Diese Betrachtungen sind notwendig für die Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Verformung und Korngröße bei einer bestimmten Temperatur. Sie gestatten es, den Gang der Untersuchung festzulegen und die Einschränkungen zu erkennen, die bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse getroffen werden müssen.

Da bei jedem Stich eine Verformung des Materials stattfindet, durch die infolge der hohen Temperaturen die Korngröße weitgehend verändert werden kann, war es zunächst

1) Festgestellt von Knoll in einer noch nicht veröffentlichten Arbeit.

unerläßlich, festzustellen, in welcher Weise die Ausgangskorngröße auf den Verlauf der Rekristallisation einwirkte. Danach wurde der Zusammenhang zwischen Walzdruck, Walztemperatur und Korngröße bei einer bestimmten chemischen Zusammensetzung des Materials im Querschnitt und im Längsschnitt ermittelt, indem bei den Temperaturen von 680°, 700°, 750° 850°, 925°, 1000°, 1100°, 1200° C Stäbe mit verschiedenen Drücken gewalzt und untersucht wurden. Hierbei wurde die Korngröße immer in der Mitte des Walzgutes gemessen, wo, wie später ausgeführt sei, vermutlich das Maximum der Verformung liegt. Der Durchmesser und die Geschwindigkeit der Walzen, sowie die Beschaffenheit der Walzoberfläche entsprachen den Verhältnissen der Praxis. Gleichzeitig wurde die Korngröße in den Zonen behinderter Verformung ermittelt, indem das Gefüge nicht nur in Zone II, sondern auch in der Randzone I im Querschnitt und im Längsschnitt untersucht wurde. Um schließlich den Einfluß der Anfangsbreite und -höhe des Walzgutes auf den Verlauf der Rekristallisation zu erfassen, wurden Stäbe von einem Ausgangsquerschnitt von 30 mm², 40 mm² und 50 mm² gewalzt und untersucht.

B. II. Der Einfluß der Ausgangskorngröße auf den Verlauf der Rekristallisation.

Die Versuche wurden so durchgeführt, daß dieser Einfluß gemessen werden konnte,

a) wenn die Stäbe entsprechend den Schmiedeproben von Hanemann und Lucke nach dem Walzen 5 Minuten lang im Ofen bei Walztemperatur geglüht und im Sandbad abgekühlt wurden,

b) wenn die Walzproben auf einer Platte gemäß den Verhältnissen der Praxis erkalteten.

Die Untersuchungen wurden in der Walzwerksversuchsanstalt der Technischen Hochschule Breslau an einem Krupp'schen Weicheisen vom Querschnitt 30 mm² vorgenommen. Das Erhitzen der Stäbe fand in einem Steinstrahlofen der Mindoga-Gesellschaft Essen statt, dessen Herdfläche 60×120 cm² beträgt und der mit Leuchtgas und Luftgebläse betrieben wird. Die Ofentemperaturen wurden mit einem Thermoelement gemessen, das vom Gewölbe bis etwa 1/3 der Herdhöhe in die Ofenmitte eingeführt wurde. Das Walzen erfolgte auf einem Triogerüst von 447 mm ⌀ und 800 mm Ballenlänge. Zur

genauen Bestimmung der Walztemperatur war es notwendig, die Abkühlung zu berücksichtigen, die der Knüppel auf seinem Wege vom Ofen bis zur Walze erfährt. Hierzu wurde zunächst bei etwa 10 Versuchen mit der Stoppuhr die Zeit festgestellt, die zwischen dem Ziehen des Stabes aus dem Ofen und dem Greifen der Walzen verstrich. Sie betrug im Mittel 10 Sekunden. Hernach wurde eine Probe mit den gleichen Abmessungen wie der Versuchskörper angebohrt, mit einem Thermoelement versehen, auf 1000° C erhitzt und an der Luft abgekühlt, wobei nach je 3 Sekunden die Temperaturen gemessen wurden. Es ergab sich eine Kurve, nach der die Temperatur eines Stabes von 1000° C bei der Abkühlung an der Luft in 8 bis 10 Sekunden um durchschnittlich 10° fällt. Es wurde daher bei sämtlichen Versuchen die Ofentemperatur 10° über der angegebenen Walztemperatur gehalten.

Der absolute Walzdruck wurde aus der Differenz der Höhe h_1 des Stabes vor und h_2 nach dem Stich, der prozentuale als der Quotient $\frac{h_1 - h_2}{h_1} \cdot 100$ ermittelt. Da sämtliche Proben vor dem Walzen auf 2 Seiten abgehobelt wurden, konnten die Höhen auf $^1/_{100}$ mm genau mit der Mikrometerschraube gemessen werden.

Das Krupp'sche Weicheisen hatte folgende chemische Zusammensetzung:

0,03% C, 0,03% Si, 0,08% Mn, 0,01% P, 0,012% S. Sein Gefüge besteht aus einem unregelmäßigen Netzwerk von Ferrit mit geringen Mengen Perlit. Beim Erhitzen des Weicheisens beginnt bei 721° C der Perlit in γ-Mischkristalle und α-Eisen zu zerfallen. Mit steigender Temperatur ändert der γ-Mischkristall seine Zusammensetzung gemäß der Linie GOS, während das α-Eisen, zuerst beständig, bei 768° sich in β-Eisen umwandelt. Bei 892° vereinigen sich β-Eisen und γ-Mischkristall zu einem γ-Mischkristall mit 0,03% C. Für die Umwandlung von α in γ-Eisen sowie für die Einstellung des Gleichgewichtes zwischen γ-Mischkristall und den einzelnen Eisenmodifikationen ist eine gewisse Zeit erforderlich. Dieser Tatsache wurde bei sämtlichen Versuchen dadurch Rechnung getragen, daß die Stäbe vor dem Walzen etwa 30 Minuten lang im Ofen 10° über Walztemperatur geglüht wurden.

Von dem Versuchsmaterial wurden zunächst auf einer Kaltsäge 4 Stangen von je 85 cm Länge abgeschnitten, in denen

durch Glühen im γ-Gebiet bei verschiedenen Temperaturen wechselnde Korngrößen erzeugt wurden. Hierauf wurden sie auf 2 Seiten mit den nötigen Vorsichtsmaßregeln gegen Umkristallisation abgehobelt und in 3 Teile zersägt. Der erste Teil wurde bei 1000° C gewalzt, hernach im Ofen 5 Minuten lang geglüht und im Sandbad abgekühlt, während der zweite bei 1000° C gewalzt und der Luftabkühlung auf einer Platte überlassen wurde und der dritte zur Feststellung der Ausgangskorngröße diente. Aus sämtlichen Stäben wurde nach dem Erkalten in der Mitte ein Stück von etwa 2 cm Länge herausgeschnitten, senkrecht zur Walzrichtung angeschliffen, poliert und in 1%iger alkoholischer Salpetersäure geätzt. Nun wurde mit einer Reißnadel die Mitte des fast rechteckigen Querschnittes angezeichnet und das Schliffbild entweder direkt auf Bromsilberpapier 9×12 oder auf Platten 9×9 photographiert.

Die Kornmessung erfolgte nach dem Kreisverfahren von Zay Jeffries:[19] Es wird in das Bild des Schliffes ein Kreis von bekanntem Durchmesser eingetragen und die Zahl der ganzen und der vom Kreis geschnittenen Randkörner festgestellt. Ist K der Flächeninhalt des Kreises im mm², z die Zahl der ganzen Körner, c diejenige der Randkörner, V die angewandte lineare Vergrößerung, so beträgt die mittlere Korngröße:

$$\varphi = \frac{K}{c \cdot n + z} \cdot \frac{1}{V^2},$$

wobei n ein von Jeffries experimentell zu 0,6 gefundener Faktor ist.

Bei der Photographie des Schliffbildes wurde die lineare Vergrößerung V stets so gewählt, daß die Zahl der vom Kreis umschlossenen Körner etwa 150 betrug.

Das Resultat dieser Versuche ist folgendes: Die Ausgangskorngrößen betrugen 1480 μ^2, 3860 μ^2, 7340 μ^2, und 7 800 μ^2; sie wiesen also sehr große Unterschiede auf. Nach dem Walzen mit etwa 7% Druck betrug die Größe des Kornes bei sämtlichen Stäben durchschnittlich 800 μ^2. Eine zweite Versuchsreihe mit höheren Walzdrücken hatte das gleiche Ergebnis: Stäbe mit einer Ausgangskorngröße von 655 μ^2, 950 μ^2, 1068 μ^2 wiesen nach dem Walzen bei 1000° C mit 14% Druck gleiche Korngrößen von 850 μ^2 auf.

Die Größe des Ausgangskornes scheint demnach auf die nach dem Walzen sich einstellende

Korngröße und auf den Verlauf der Rekristallisation keinen Einfluß zu haben, ein Ergebnis von beträchtlicher Bedeutung. Die endgültige Korngröße gewalzten Stab- oder Profileisens wird also nur von Druck und Temperatur des letzten Stiches bestimmt und ist unabhängig von sämtlichen Aenderungen des Gefüges, die in den vorhergehenden Stichen stattfinden.

Dieses Resultat wurde noch dadurch erweitert, daß das Gefüge der Walzproben in Schnitten in der Walzrichtung nach dem gleichen Verfahren wie oben untersucht wurde. Danach sind die Korngrößen der gewalzten Stäbe in den Schliffen längs und quer zur Walzrichtung annähernd gleich groß; es findet also beim Walzen bei 1000° keine Streckung der Körner nach irgend einer Richtung statt.

Diese Feststellungen bilden die Grundlage für den weiteren Aufbau der Arbeit. Sie gestatten es, durch Untersuchung des Gefüges nur nach einem Stich Gesetze über die Abhängigkeit der Korngröße von Walzdruck und Walztemperatur aufzustellen, die auf die wesentlich verwickelteren Vorgänge der Praxis übertragbar sind.

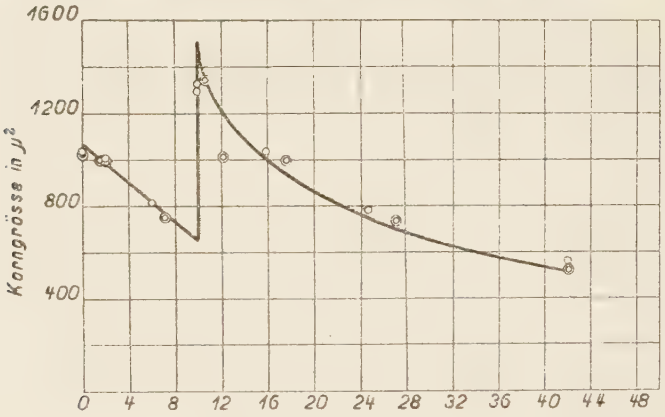
B. III. Die Abhängigkeit der Korngröße von Walzdruck und Walztemperatur an durchgewalzten Stäben[1] gemessen.

1) bei 1000° C.

26 Stäbe aus Krupp'schem Weicheisen von 40 cm Länge und 30 mm² Querschnitt wurden auf 2 Seiten behobelt, auf 1010° C erhitzt, eine halbe Stunde zur Einstellung des Gleichgewichtes geglüht und mit verschiedenen Drücken gewalzt. Es wurden immer 2 Stäbe mit möglichst gleichem Druck hintereinander gewalzt, von denen der eine auf eine Platte gebracht, der andere im Ofen 5 Minuten lang geglüht und im Sandbad abgekühlt wurde. Aus der Mitte der erkalteten Walzproben wurde ein Stück von 2 cm Länge herausgesägt, senkrecht zur Walzrichtung angeschliffen, poliert, geätzt und nach dem gleichen Verfahren wie oben untersucht. Die Versuche ergaben eine gesetzmäßige Abhängigkeit der Korngröße

1) Stäbe, welche die Walzen ganz durchlaufen haben, zum Unterschied von „Uebergängen", bei denen der Walzprozeß mitten im Stich unterbrochen wurde.

vom Walzdruck, wie sie aus Diagramm 1 hervorgeht. Auf der Abszisse des Diagramms sind die Walzdrücke in %, auf der Ordinate die Korngröße in μ^2 aufgetragen. Die Doppelkreise geben die Resultate der auf der Platte erkalteten, die einfachen Kreise der im Ofen geglühten Stäbe an. Bis zu einem Walzdruck von 9,9% sinkt die Korngröße von 1070 μ^2 auf 650 μ^2 herab,. erreicht bei Ueberschreitung des Druckes von 9,9% — dem Schwellenwert — ein Maximum von 1500 μ^2, von dem sie mit steigendem Druck auf 500 μ^2 fällt. Die annähernd übereinstimmende Lage läßt erkennen,



Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 1000°.
(Im Querschnitt ermittelt.)
Diagramm 1.

daß die Korngröße von Stäben, die auf der Platte erkalteten, gleich derjenigen ist, die im Ofen geglüht und im Sandbad abgekühlt wurden.

2) bei 925° C.

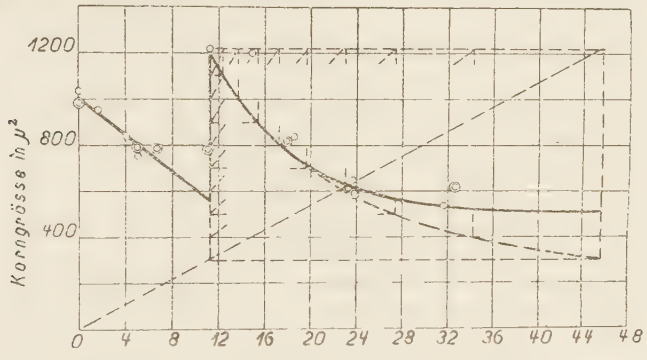
Der Schwellenwert liegt bei 11,3% Druck. Von 0% bis 11,3% Druck sinkt die Korngröße von 970 μ^2 auf 560 μ^2, erreicht bei 11,3% Druck ein Maximum von 1220 μ^2 und fällt mit höheren Drücken auf 500 μ^2 ab. Die auf der Platte erkalteten sowie die geglühten Proben weisen die gleichen Korngrößen auf.

3) bei 850° C.

Die Korngröße bleibt von 0—14,4% Druck annähernd konstant 950 μ^2, erreicht beim Schwellenwert von 14,4% eine

Höhe von 8800 μ^2 und nimmt gemäß der Kurve im Diagramm 3 bei stärkeren Drücken bis auf 2000 μ^2 ab. Ihr Wert ist bei den auf dem Rollgang erkalteten und den im Ofen geglühten Proben gleich.

Alle 3 Versuchsreihen, die mit etwa 60 Stäben durchgeführt wurden, hatten prinzipiell das gleiche Ergebnis: bei kleinen Drücken sinkt die Korngröße oder bleibt konstant, beim Schwellenwert steigt sie durch Rekristallisation beträchtlich an und fällt von diesem Maximum mit wachsendem Druck allmählich ab. Ihr Wert ist unabhängig von den beiden gewählten Arten der Abkühlung, allerdings unter folgender Voraussetzung:



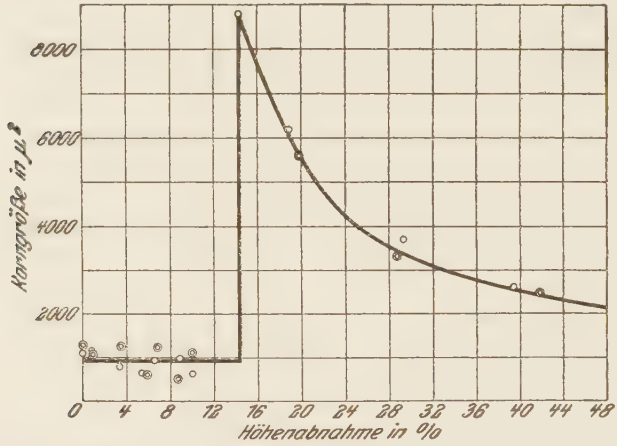
Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 925°. (Im Querschnitt ermittelt.)
Diagramm 2.

Der Wärmeinhalt des auf der Platte erkalteten Stabes muß die zur vollständigen Neubildung des Gefüges notwendige Energie liefern können. Bei den Stäben von 40 cm Anfangslänge wurde diese Forderung erfüllt; bei den Walzproben von 20 cm Länge dagegen reichte die Energie nicht zur vollständigen Rekristallisation aus, sodaß die Korngrößen der auf der Platte erkalteten Proben kleiner waren als diejenigen der im Ofen geglühten Stäbe.

Bei den oben angeführten Versuchen trat deutlich der eingangs erwähnte Einfluß der Zonen geringen Fließens auf den Rekristallisationsverlauf hervor. Da er am stärksten bei den Proben war, deren Walztemperatur 850° C betrug, wurde bei diesen die Korngröße am Rande, senkrecht über der Mitte, mit folgendem Ergebnis gemessen. Vor 14,4% Druck ist die Korn-

größe über den Querschnitt fast gleich. Bei 14,4% Druck setzt die Rekristallisation in der Mitte ein, wo vermutlich das Maximum der Verformung liegt, während die Randzonen ein kleines Korn, von Gleitlinien durchsetzt, aufweisen. Der Schwellenwert der Randzone liegt also bei höheren Drücken als in der Mitte. Nach seiner Ueberschreitung fällt die Korngröße am Rande mit steigenden Drücken ab, behält aber meist höhere Werte als die Mitte.

Die Untersuchung zeigt, daß die Unterschiede in der Korngröße über den Querschnitt eines gewalzten Stabes recht



Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 850°, (im Querschnitt durchgewalzter Stäbe ermittelt). Diagramm 3.

beträchtlich sein können. Am größten sind die Differenzen unmittelbar nach Ueberschreiten des Schwellenwertes, das ist also ein gefährlicher Bereich, in dem der Druck des letzten Stiches für die Gewinnung einer verhältnismäßig gleichen Korngröße in keinem Falle liegen darf.

B. IV. Die Abhängigkeit der Korngröße von Walzdruck und Walztemperatur in der Mitte von Uebergängen gemessen.

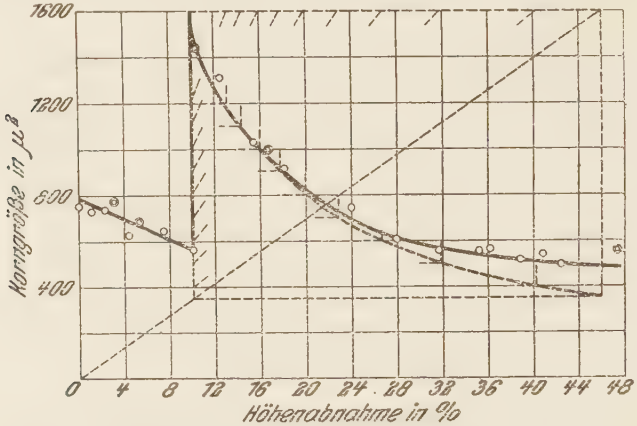
Es war sehr schwierig, durch Walzproben den Verlauf der Rekristallisation und die genaue Lage des Schwellenwertes festzulegen. Einesteil wäre hierfür eine sehr große Anzahl von

Versuchen erforderlich; andererseits müßte man in der Lage sein, den Walzdruck auf $^1/_{10}$ mm genau vor dem Stich einzustellen. Dies ist wegen des Springens der Walzen nur auf umständlichem Wege möglich. In der Walzwerksversuchsanstalt bot sich jedoch folgender Weg zur genauen Ermittlung des Verlaufes der Rekristallisation:

Das Versuchsgerüst ist mit einer ausrückbaren Kupplung ausgestattet, die es ermöglicht, jederzeit die Walzen zum Stillstand zu bringen und den Walzprozeß zu unterbrechen. Man erhält auf diese Weise Uebergänge vom ungewalzten zum gewalzten Stück. Die Uebergänge enthalten sämtliche Druckstufen von 0% bis zum jeweiligen Höchstdruck und ermöglichen daher, das Gefüge bei jedem gewünschten Druck zu untersuchen. Jedoch trat bei diesem Verfahren die Frage auf, ob in der Mitte eines Ueberganges die gleichen Druckverhältnisse vorliegen, wie in der Mitte durchgewalzter Stäbe. Wie im vorigen Abschnitt dargelegt, ist die Korngröße bei einer bestimmten Temperatur ein Maß für den Walzdruck. Zur Beantwortung obiger Frage braucht also nur die Korngröße in der Mitte eines Ueberganges gemessen und mit den Resultaten der durchgewalzten Stäbe verglichen zu werden. Dies geschah auf folgende Weise:

Zwei Stäbe von 40 cm Länge und 30×30 mm² Querschnitt wurden auf 2 Seiten behobelt, im Gasofen auf 1010° erhitzt, $^1/_2$ Stunde geglüht und gewalzt. Hierbei wurden die Walzen, die auf einen Druck von etwa 50% eingestellt waren, unmittelbar nach dem Erfassen des Materials ausgekuppelt und hochgezogen, sodaß die Stäbe herausgenommen, in den Ofen zurückgebracht, 5 Minuten lang geglüht und im Sandbad abgekühlt werden konnten. Nach dem Erkalten wurden die Uebergänge in der Walzrichtung zersägt, geschliffen, poliert und geätzt. Ihre Mitte wurde mit einer Reißnadel durch 2 Linien gekennzeichnet, die durch Senkrechte von etwa 2 mm Abstand in einzelne kleine Vierecke eingeteilt wurde. Die Körner der Mitte dieser Vierecke wurden mit geeigneter Vergrößerung photographiert und nach dem Verfahren von Zay Jeffries gezählt. Der Druck wurde wieder als Quotient $\frac{h_1 - h_2}{h_1} \cdot 100\%$ ermittelt, wobei h_2 die jeweils als das arithmetische Mittel aus 2 Senkrechten gemessene Höhe war.

Die Versuche ergaben die in Diagramm 4 dargestellte Abhängigkeit der Korngröße vom Walzdruck. Von 0—10% Druck fällt die Korngröße von 790 μ^2 auf 560 μ^2, erreicht im Schwellenwert von 10% ein Maximum von 1600 μ^2, von dem sie mit steigendem Druck auf 480 μ^2 sinkt. Die Uebereinstimmung dieser Kurve mit der in Diagramm 1 dargestellten beweist, daß in der Mitte eines Ueberganges die gleichen Zusammenhänge zwischen Korngröße und Walzdruck und somit auch die gleichen Verformungen bestehen, wie in der Mitte durchgewalzter Stäbe.

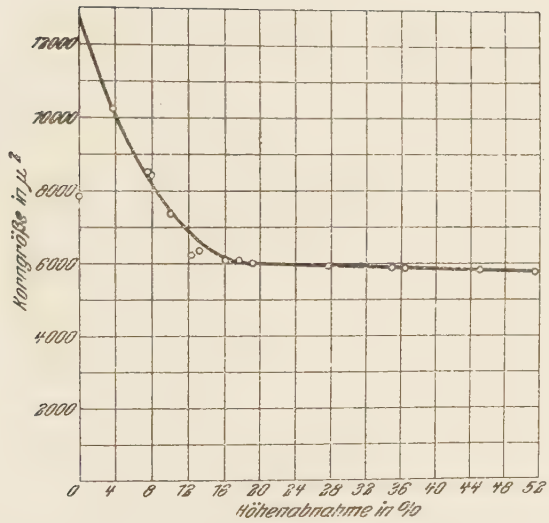


Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 1000°. (im Längsschnitt eines Ueberganges ermittelt).
Diagramm 4.

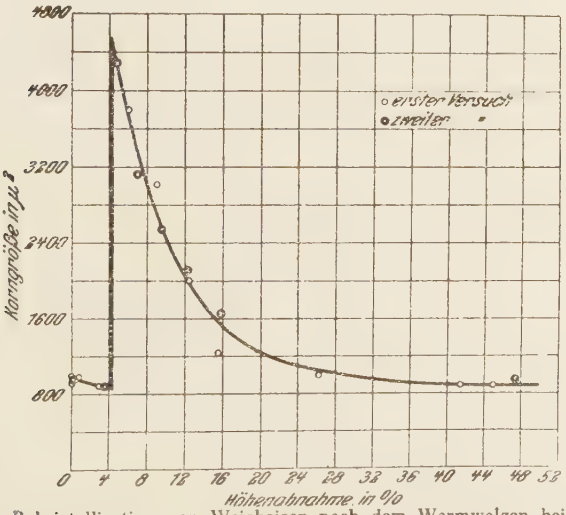
Dieses Ergebnis berechtigt dazu, die Rekristallisation des Weicheisens bei verschiedenen Temperaturen anhand von Uebergängen festzustellen. Es wurden demnach bei den Temperaturen von 1200°C, 1100°C, 925°C, 850°C, 750°C, 700°C, 680°C Uebergänge gewalzt und nach den oben angeführten Verfahren untersucht.

2) Walztemperatur 1200° C.

Diagramm 5 gibt die Abhängigkeit der Korngröße vom Walzdruck bei 1200° C an. Sie zeigt, daß schon bei einer Deformation gleich null infolge hoher Temperatur eine Neubildung des Gefüges eintritt. Das Diagramm weist infolgedessen keinen Schwellenwert, sondern ein gleichmäßiges Fallen der Korngröße von 12750 μ^2 auf 5750 μ^2 auf. Das Gefüge besteht aus einem Haufwerk regellos angeordneter grober Körner.



Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 1200°, (im Längsschnitt eines Ueberganges ermittelt).
Diagramm 5.



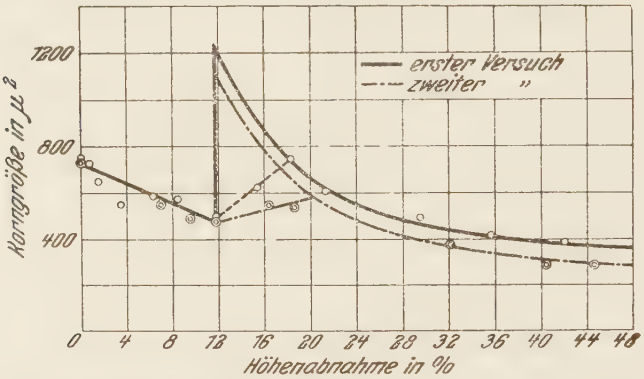
Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 1100°, (im Längsschnitt eines Ueberganges ermittelt).
Diagramm 6.

3) Walztemperatur 1100° C.

Der Schwellenwert liegt bei 4,2% Druck. (Diagramm 6). Von 0% bis 4,2% sinkt die Korngröße von 990 μ^2 auf 850 μ^2, erreicht bei 4,2% ein Maximum von 4800 μ^2, von dem sie mit fortschreitender Verformung auf 860 μ^2 fällt.

4) Walztemperatur 925° C.

Die bei 925° C gewalzten Uebergänge weisen keinen ausgeprägten Schwellenwert auf. (Diagramm 7.) Seine Lage und Größe gehen jedoch aus den auf Seite 12 beschriebenen Versuchen an durchgewalzten Stäben hervor. Danach sinkt die Korngröße von 0% bis 11,8% Druck von 720 μ^2 auf 470 μ^2;



Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 925°, (im Längsschnitt eines Ueberganges ermittelt)
Diagramm 7.

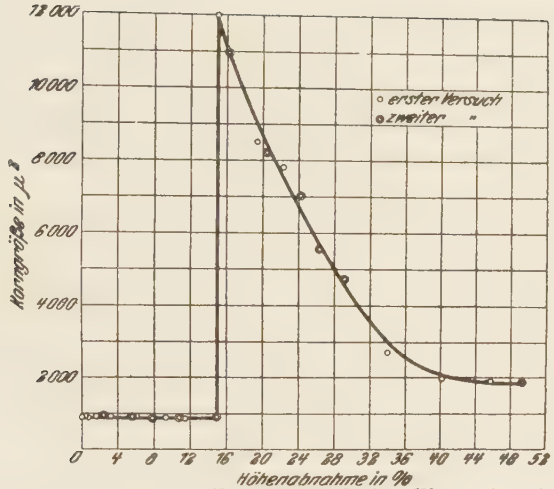
bei Ueberschreitung des Schwellenwertes von 11,8% Druck sinkt sie mit wachsender Verformung von 1220 μ^2 auf 360 μ^2. (Uebergang von γ ins β-Gebiet.)

5. Walztemperatur 850°C.

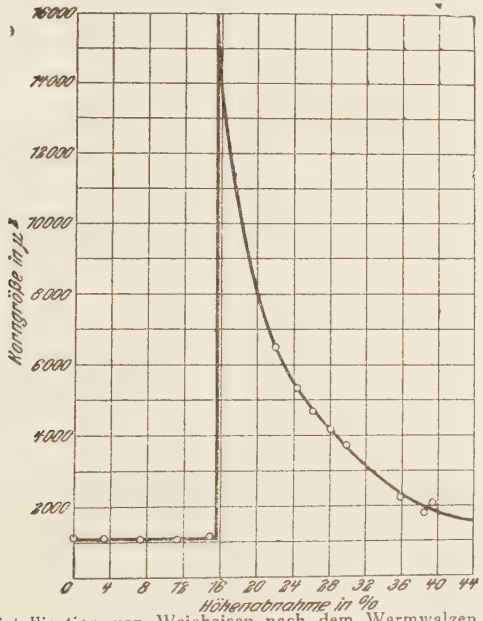
Die Körngröße bleibt von 0% bis 15% Druck konstant 900 μ^2, steigt im Schwellenwert auf 12000 μ^2 und fällt bei steigender Verformung auf 1800 μ^2 ab. (Diagramm 8.) Bei diesen Versuchen war eine deutliche Streckung des rekristallisierten Kornes in der Walzrichtung zu beobachten, sodaß das Korn im Längsschnitt größer als im Querschnitt war.

6. Walztemperatur 750°C.

Die Korngröße beträgt von 0% bis 15,6% Druck konstant 1125 μ^2, steigt im Schwellenwert von 15,6% Druck auf 16000 μ^2 an und fällt mit wachsendem Druck auf 1500 μ^2. Das



Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 850°, (im Längsschnitt eines Ueberganges ermittelt).
Diagramm 8.



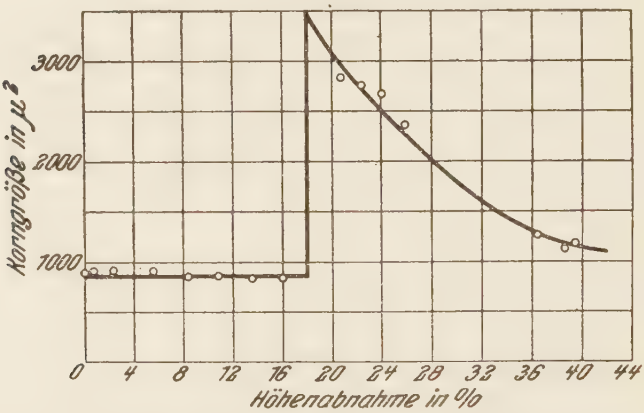
Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 750°, (im Längsschnitt eines Ueberganges ermittelt).
Diagramm 9.

rekristallisierte Korn wies eine Streckung in der Walzrichtung auf.

7. Walztemperatur 700° C.

Infolge der niedrigen Temperaturen wurden die Walzen nur auf einen Druck von 39% eingestellt, da bei höheren Drücken ein Bruch des Brechtopfes zu befürchten war. Der Schwellenwert liegt bei 18% Druck.

In ihm erreicht die Korngröße, die von 0% bis 18% Druck konstant 850 μ^2 beträgt, eine Höhe von 3500 μ^2, von der sie mit wachsender Verformung auf 1 100 μ^2 fällt. (Diagramm 10.)

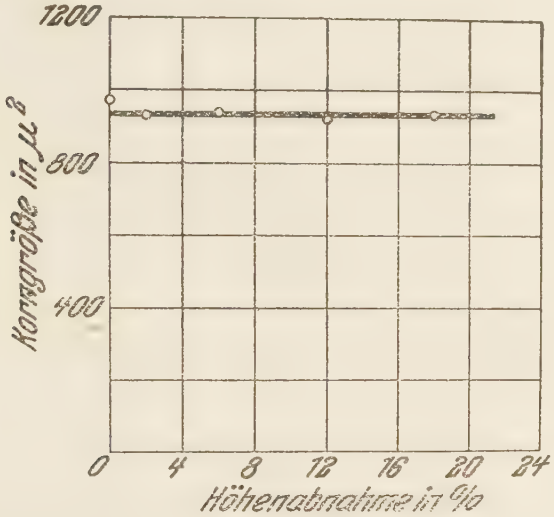


Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 700°, (im Längsschnitt eines Ueberganges ermittelt).
Diagramm 10.

8. Walztemperatur 680° C.

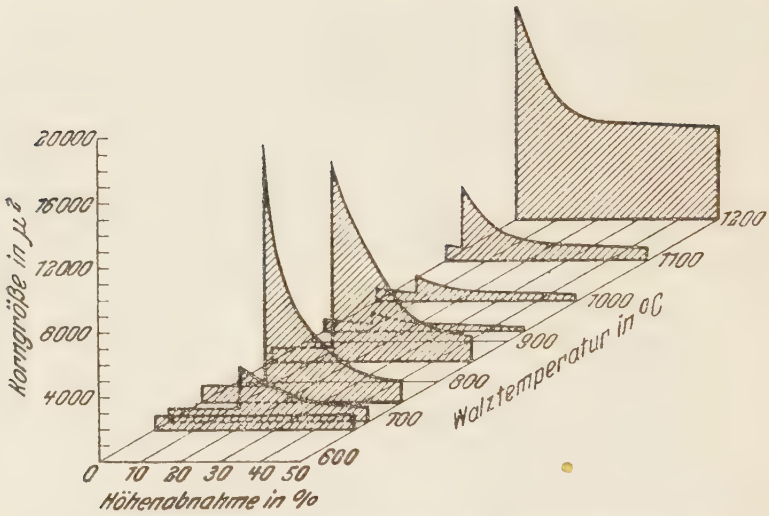
Bei den bei 680° mit einem Maximaldruck von 38% gewalzten Uebergängen trat keine Neubildung des Gefüges auf. Im Schliffbild war eine deutliche Streckung der Körner mit steigendem Verformungsgrad zu erkennen. Die Kornzählung konnte nur bis zu einem Druck von 20% ausgeführt werden, da bei höherer Deformation Zahl und Stärke der Gleitlinien innerhalb der Körner so groß wurden, daß eine Unterscheidung zwischen ihnen und den Korngrenzen unmöglich wurde. Diagramm 11 gibt das Ergebnis der Untersuchung an, nach welcher die Korngröße bis 18% Druck konstant 940 μ^2 beträgt.

Die Resultate dieser Versuche sind im Raumdiagramm der Abb. 5 zusammengefaßt. Auf der X-Achse sind die Walzdrücke in %, auf der Y-Achse die Korngrößen in μ^2 und auf der Z-Achse die Temperaturen in °C aufgetragen.



Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 680°, (im Längsschnitt eines Ueberganges ermittelt).
Diagramm 11.

Hanemann und Lucke konnten bei ihren Versuchen feststellen, daß der Verlauf der Korngröße bei steigendem Druck mit gewisser Annäherung nach einer gleichseitigen Hyperbel erfolgt. Bei den vorliegenden Versuchen jedoch trat diese Gesetzmäßigkeit nicht auf. In den Diagrammen 2 und 4 sind nach der Strahlenkonstruktion die Hyperbeln eingezeichnet, deren Asymptoten die Koordinaten bilden. Danach stimmt unmittelbar nach dem Ueberschreiten des Schwellenwertes der Verlauf der Kurve mit einer Hyperbel überein, während bei stärkeren Drücken größere Abweichungen auftreten. Bei keiner der übrigen 5 Versuchstemperaturen war eine Uebereinstimmung auch im ersten Teil der Kurve zu erblicken, sodaß hieraus gefolgert werden kann, daß Verformungsgrad und Korngröße beim Warmwalzen nicht in der gleichen einfachen Beziehung wie beim Stauchversuch stehen.



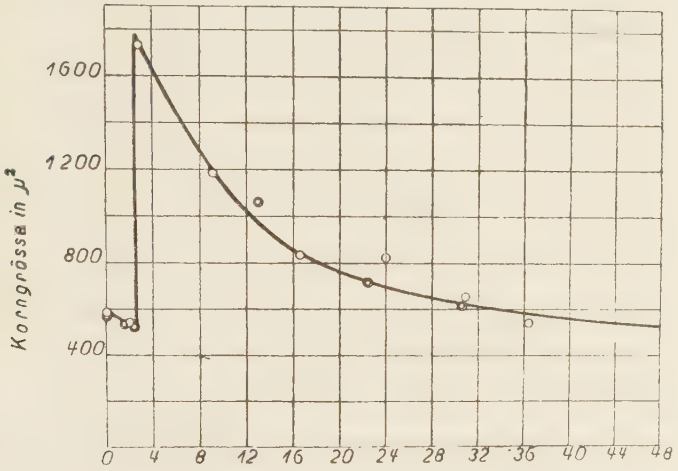
Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen.
Abb. 5.

B. V. Der Verlauf der Rekristallisation am Rande eines Ueberganges.

Bei den Ausführungen über die plastische Deformation eines Metalls beim Walzen ist erwähnt worden, daß beim Erfassen des Materials die bleibende Formänderung, in den Randzonen beginnend, sich nach der Stabmitte fortsetzt. Dieser Vorgang konnte bei sämtlichen Versuchen festgestellt werden. Im Diagramm 12 ist der Verlauf der Rekristallisation am Rande eines Ueberganges gemessen in Abhängigkeit vom Walzdruck bei einer Walztemperatur von 1000°C angegeben. Von 0% bis 2,3% Druck fällt die Korngröße von 570 μ² auf 510 μ²; beim Schwellenwert von 3,2% erreicht sie einen Wert von 1800 μ², von dem sie mit fortschreitender Verformung auf 540 μ² sinkt. Die Rekristallisation beginnt also am Rande bei einem geringeren prozentualen Druck als in der Mitte. (siehe Diagramm 4 und 12.)

Die großen Differenzen in der Korngröße beim Schwellenwert wurden beim Aetzen durch starke Helligkeitsunterschiede makroskopisch sichtbar und ermöglichten es, den Verlauf des Schwellenwertes von der Mitte nach dem Rande zu mit bloßem Auge zu verfolgen. Die Abbildung 6 stellt eine Photographie des

geätzten Ueberganges dar, auf welcher die Lage des Schwellenwertes als Trennungslinie zwischen heller und dunkler Zone **erkennbar** ist. Es ergab sich eine fast völlige Uebereinstimmung zwischen dem Verlauf des Schwellenwertes von dem Rande nach der Mitte mit einer Parabel.



Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen bei 1000°, am Rande eines Ueberganges ermittelt.
Diagramm 12.

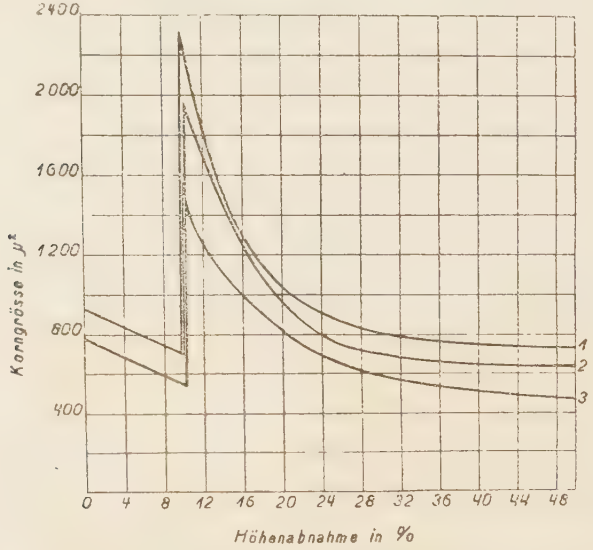
Photographie eines geätzten Ueberganges.
Abb. 6.

B. VI. Der Einfluß der Anfangshöhe auf den Verlauf der Rekristallisation.

Das Fortschreiten der plastischen Verformung vom Rande nach der Mitte des Walzstabes ist abhängig von der Höhe

des Ausgangsmaterials; demnach wird auch der Zusammenhang zwischen Korngröße und Walzdruck abhängig sein von der Größe des Anfangsquerschnittes. Um diesen Einfluß zu erkennen, wurden folgende Versuche angestellt:

Es wurde der Verlauf der Rekristallisation in der Mitte von Uebergängen bei einem Ausgangsquerschnitt von 30 mm², 40 mm² und 50 mm² festgestellt. Das Ergebnis ist in dem Diagramm 13 zusammengestellt. Beim 30 mm² Eisen liegt der Schwellenwert bei 10% Druck, bei 40 mm² liegt er bei 10,3% Druck und bei 50 mm² liegt er bei 9,6% Druck. Seine Lage ist demnach anscheinend unabhängig von der Größe des Anfangsquerschnittes. Dagegen weist die Rekristallisationskurve umso höhere Werte der Korngröße auf, je größer der Anfangsquerschnitt ist.



Die Rekristallisation von Weicheisen nach dem Warmwalzen von Stäben verschiedenen Anfangsquerschnittes bei einer Walztemperatur von 1000°. Kurve 1: Anfangsquerschnitt 50 mm². Kurve 2: Anfangsquerschnitt 40 mm². Kurve 3: Anfangsquerschnitt 30 mm².
Diagramm 13.

B. VII. Die Vorgänge bei der Rekristallisation.

Die ausgeführten Versuche gestatten es, über die Einwirkung des allmählich wachsenden Walzdruckes auf die Aenderung des Gefüges Aufschluß zu geben.

Die Rekristallisation des Eisens nach dem Walzen ist bis heute nur beim Kaltwalzen untersucht worden. Es bleibt mithin die Frage zu beantworten, in wieweit die bisherigen Resultate und Anschauungen mit den beim Warmwalzen gemachten Beobachtungen übereinstimmen.

Die Metalle bestehen bei gewöhnlicher Temperatur im ausgeglühten Zustand aus einem Haufwerk von Kristallen, die in ihrem Wachstum behindert wurden und unter Beibehaltung ihrer vektoriellen Eigenschaften zu regellosen Polyedern zusammengewachsen sind. Bei der Deformation eines Kristalls über die Elastizitätsgrenze hinaus verschieben sich die einzelnen Elemente gegeneinander, und es entstehen parallelle Scharen von Gleitlinien, die als treppenartige Verwerfungen sichtbar werden; und zwar kann die Gleitung entweder durch Parallelverschiebung (Translation) oder durch Umklappen der Schichten in die Zwillingsstellung erfolgen. An der Grenze des Kornes, die bei Raumtemperatur schwerer verformbar ist als das Innere, ändern die Gleitlinien ihre Richtung gemäß der Orientierung der einzelnen Kristallite zum Spannungsfeld. Gleichzeitig trachten die Kristalle danach, sich durch Drehung und Biegung in die Richtung der wirkenden Kraft einzustellen. Die Biegung bringt Spannungen in das Gitter hinein, und es entsteht, wie Polanyi[20] an Zerreißstäben feststellte, eine „Gitterzertrennung".

Die Störung des Gitters wird jedoch nicht gleichzeitig bei allen Kristalliten einsetzen, sondern zunächst bei denen, die am ungünstigsten zur Richtung der wirkenden Kraft liegen. Es bilden sich hierbei nach Masing[21] evrschiedene Verlagerungsgrade des Raumgitters innerhalb eines Metalles mit kontinuierlichen Uebergängen aus. Die Maxima geben die Stellen stärkster Raumgitterstörung, die Minima diejenigen geringster Verlagerung an. Erst bei fortschreitender Verformung greift die Deformation und Raumgitterstörung allmählich auf weitere Kristalle über, sodaß die Zahl der Störungsstellen immer größer und ihre Verteilung im Raum immer gleichmäßiger wird. Das aus einem Haufwerk homogener anisotroper Kristalle aufgebaute Material strebt einem homogenen Zustand entgegen, der im Grenzfalle zur Ausbildung der „idealen" Faserstruktur[22] führt.

Sobald jedoch durch Erhöhung der Temperatur die innere Energie des Gitters steigt, bricht der Zwangszustand zusammen,

und es tritt eine Neubildung des Gefüges ein, die als Rekristallisation bezeichnet wird. Es bilden sich nach Czochralski[7] in den höchst beanspruchten Molekelngruppen winzig kleine Rekristallisationskerne, die unter Vergrößerung des Kornes die gereckte Masse aufzehren, bis sie selbst von anderen neuen Keimen aufgezehrt werden. Czochralski nimmt an, daß der Spannungsausgleich bei der Rekristallisation unter stetiger neuer Kernbildung in einzelnen Stufen erfolgt, deren Größe von Glühzeit und Glühtemperatur abhängig ist.

Masing[21] dagegen glaubt, daß die Minima infolge ihrer größeren thermodynamischen Beständigkeit die Bedeutung von Rekristallisationskeimen haben. Sobald infolge genügender Temperaturerhöhung der instabile Zustand der Maxima zusammenbricht, streben sie danach, den stabileren der Minima unter gleichzeitiger Annahme der Orientierung einzunehmen. Erst nachdem dieser Vorgang beendet ist, beginnt eine sekundäre Rekristallisation, bei der die Körner von größerer Beständigkeit auf Kosten der weniger stabilen Nachbarn wachsen. Hierbei tritt ständig eine Vergrößerung des Kristallkornes ein. Je stärker das Material deformiert wird, umso größer wird die Zahl der Maxima und Minima. Infolgedessen setzt die Rekristallisation beim stark beanspruchten Metall an zahlreicheren Stellen ein, als beim schwach verformten, und verhindert dadurch die Entstehung eines großen Kornes. Die endgültige Korngröße ist also von der Häufigkeit der Keimbildung abhängig und ist mithin bei geringeren Deformationen größer als bei großen Verformungen.

Hanemann[22] hat die Neubildung des Gefüges durch Aufzehrung der gereckten Masse in Abhängigkeit von der Zeit bei Warmstauchversuchen untersucht. Er fand, daß die Kernzellen mit gleichbleibender Geschwindigkeit solange anwachsen, bis sie gegenseitig zur Berührung gelangen und sich in ihrem Wachstum behindern. Die Kornzahl ändert sich demnach im ersten Stadium der Rekristallisation nach einer Geraden, deren Verlauf der Gleichung entspricht $x = -c \cdot t$. Da jedoch die mittlere Größe φ aller Körner umgekehrt proportional x, also $\varphi = \frac{1}{x}$ ist, verläuft die Abhängigkeit der Korngröße von der Zeit nach einer Hyperbel mit der Gleichung $\varphi \cdot t = -\frac{1}{c}$. Erst

wenn die gesamte gereckte Masse aufgezehrt ist, geht die Hyperbel in eine schwach ansteigende Gerade über.

Wie gestalten sich diese Vorgänge beim Warmwalzen bei Temperaturen von 680—1200° C?

Bei sämtlichen Versuchen treten die gleichen typischen Kennzeichen der Kaltverformung, nämlich die Gleitlinien auf; mit steigendem Druck wächst die Zahl der Körner, die von Gleitlinien durchsetzt sind, bis sie beim Schwellenwert ein Maximum erreicht. In diesem Punkte sind die im Raumgitter vorhandenen Kräfte noch imstande, den durch die äußere Verformung hervorgerufenen Zwangszustand aufrecht zu erhalten. Bei seiner Ueberschreitung fällt der instabile Zustand zusammen, und es tritt eine Neubildung des Gefüges ein, bei der die Korngröße mit steigender Verformung sinkt. Beim Warmwalzen treten also die gleichen typischen Merkmale, wie bei der Kaltverformung mit nachträglicher Rekristallisation auf: die Gleitflächenbildung und die Abhängigkeit der Korngröße von Temperatur und Verformungsgrad. Es darf hieraus gefolgert werden, daß bei beiden Prozessen im allgemeinen die gleichen Vorgänge stattfinden.

In dem Rekristallisationsdiagramm (Abb. 5) treten zwei Maxima der Korngröße auf: bei 1200° und bei 750° C. Von 1200° bis 925° und von 750° bis 850° und 700° C nehmen die absoluten Werte der Korngröße stark ab. Diese Erscheinung rührt vermutlich daher, daß das Rekristallisationsschaubild eigentlich 2 Diagramme umfaßt: Eines für das γ-Gebiet und eines für die α-Phase des Eisens. Bei 925°, also kurz oberhalb GOS, besteht das Eisen aus γ-Mischkristallen und besitzt, wie jeder Glühversuch lehrt, ein Maximum von Kristallisationskeimen. Da nun bei der Umwandlung von γ in α-Eisen die Korngröße der festen Lösung diejenige des α-Eisens bestimmt, resultiert aus einem Minimum der Größe des Mischkristalls ein Minimum der Korngröße des Ferrit-Perlit-Gemisches. Mit steigender Temperatur wächst der γ-Mischkristall und bedingt bei der Abkühlung ein grobes Ferritkorn.

In dem Intervall von 720—900° C besteht das Gefüge des Eisens aus dem ursprünglichen Ferrit-Perlit-Gemisch neben einem mit wachsender Temperatur immer größer werdenden Anteil an fester Lösung. Die Bildung der γ-Mischkristalle und ihr Zerfall bei der Abkühlung bedingt eine Erhöhung der Zahl der Kristallisationskeime und infolgedessen ein kleines

Ferritkorn. Es wird also in diesem Bereich die Korngröße einen umso größeren Wert erreichen, je geringer der Anteil an fester Lösung ist, eine Vermutung, die durch das Maximum der Korngröße bei 750° und ihr Sinken nach 850° und 700° hin bestätigt wird.

In der Abhängigkeit der Korngröße vom Walzdruck vor dem Schwellenwert gibt das Raumdiagramm an, daß bei Walzproben über 900° C die Korngröße mit wachsender Verformung nach einer Geraden fällt, während sie bei den Versuchen von 680°, 700°, 750° und 850 konstant bleibt. Diese erstere Erscheinung trat bei den Stauchversuchen Hanemanns nicht auf; ihre Erklärung muß also in dem Wesen des Walzprozesses gesucht werden.

Es darf zunächst angenommen werden, daß das Kornvolumen konstant bleibt. Hierzu berechtigen die Ergebnisse aus den Festigkeitsversuchen an kaltgezogenen Drähten, bei denen Altpeter[23] fand, daß das Kornvolumen bis zu einer Streckung von 3,06 sich nicht ändert, eine Streckung, die höher ist als bei den vorliegenden Versuchen.

Es lag ferner die Vermutung nahe, daß das Fallen der Korngröße vor dem Schwellenwert auf eine Streckung der Körner in der Walzrichtung zurückzuführen sei. Der Versuch hat diese Annahme nicht bestätigt. Nimmt man an, daß die Kristallite im ausgeglühten Stab etwa die Form von Kugeln besitzen, und daß durch eine Streckung des Materials aus den Kugeln Rotationsellipsoide werden, so müßte die Korngröße nach dem Walzen im Schnitt senkrecht zur Walzrichtung zwar kleiner, in der Walzrichtung dagegen größer werden. Der Versuch ergab, daß eine Streckung der Körner über 900° C nicht stattfindet, und daß die Korngröße vor dem Schwellenwert sowohl im Querschnitt als auch im Längsschnitt sinkt.

Es scheint, daß das Fallen der Korngröße mit einer Erscheinung im Zusammenhang steht, die Rosenhain[24] in seiner Arbeit über den kristallisierten und amorphen Zustand der Metalle näher ausführte. Er fand, daß bei Warmzerreißversuchen über 900° die Körner sehr wenig gestreckt werden, während die Kristallgrenzen eine große Störung ihrer ursprünglichen Lage erfahren. Dies rührt seines Er. daher, daß bei 900° C die Bildung des γ-Mischkristalles einsetzt und die Kristalle in diesem Punkte eine Erhöhung ihrer Festigkeit erfahren, während die Korngrenzen mit steigender

Temperatur regelmäßig weicher werden. Ueber 900° ist der Kristall härter als die Korngrenze, unter 900° tritt das Gegenteil auf. Die Verformung eines Metalls über 900° wird demnach hauptsächlich in der Verschiebung der Kristallgrenzen erfolgen, vorausgesetzt, daß die Deformation langsam vor sich geht und der Korngrenze Zeit zur Aenderung ihrer Lage gegeben ist. Da beim Walzen mit geringen Drücken die Stauchgeschwindigkeit klein ist, scheint diese Voraussetzung bei den ausgeführten Versuchen erfüllt zu sein, während sie bei den Schlagversuchen Hanemanns nicht vorlag. Da ferner im ausgeglühten Metall die Raumerfüllung durch die Kristalle nicht vollkommen ist, ist es möglich, daß beim Walzen über 900° infolge der geringeren Festigkeit der Korngrenzen ein Schließen aller Lücken und dadurch eine Vergrößerung der Kornzahl und Verringerung der Korngröße in der Flächeneinheit stattfindet. Gegen diese Annahme spricht die geringe Aenderung des spez. Gewichtes und die Tatsache, daß Lücken im Walzgut im Schliff nicht zu finden sind.

Unter 900° ist die Korngrenze härter als das Korn selbst und setzt einer Verschiebung der Kristallite gegeneinander erhöhten Widerstand entgegen; die Korngröße bleibt bis zum Schwellenwert konstant.

B. VIII. Nutzanwendung der Rekristallisationsdiagramme.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind für wissenschaftliche Untersuchungen über die bildsame Formänderung beim Walzen sowie für den praktischen Walzwerksbetrieb von folgender Bedeutung:

Das Raumdiagramm gibt an, daß die 3 Faktoren Druck, Temperatur und Korngröße in einer Beziehung von der Form $f[\varphi, (h_1 - h_2), t] = 0$ stehen, sodaß jede dieser 3 Größen mit Hilfe der beiden anderen bestimmt werden kann. Es ist daher die Möglichkeit geboten, bei einer bekannten Walztemperatur durch Ermittlung der Korngröße die Druckverhältnisse, die im Querschnitt und im Längsschnitt eines Walzkörpers beim Walzen vorhanden waren, an jeder beliebigen Stelle festzustellen und dadurch den Verlauf der plastischen Formänderung zu verfolgen. Andererseits kann aus dem Diagramm durch Bestimmung von Druck und Korngröße die Temperatur beim letzten Stich festgestellt werden.

Dem Praktiker geben die Untersuchungen eine Maßnahme zur Erzielung einer günstigsten Korngröße in die Hand. Wie aus der Einleitung hervorgeht, stellt die Korngröße von 4500 μ^2 einen gefährlichen Wert dar, bei dessen Ueberschreitung die mechanischen Eigenschaften stark verschlechtert werden. Der Walzwerker muß daher danach trachten, Druck und Temperatur des letzten Stiches so zu halten, daß diese Größe nicht erreicht wird. Das Raumdiagramm (S. 21) zeigt, daß die Gefahr eines sehr groben Kornes bei einer Walztemperatur von 850° und 750° C vorliegt, wo Werte von 12000 μ^2 und 17000 μ^2 erreicht werden. Bei einer Walztemperatur von 900° C dagegen halten sich die Korngrößen in den Grenzen von 400 und 1200 μ^2. Es ist deshalb zweckmäßig, wenn möglich den letzten Stich nicht unter 900° C zu walzen.

Ist diese Forderung nicht erfüllbar und muß das Walzen in dem Temperaturbereich von 721—900° C mit mehr als 15% Druck erfolgen, so wird das Material stellenweise grobkörnig, verliert also an Härte. (Kerbzähigkeit.).

Beim Walzen von kleinen Profil- und Stabeisensorten sowie bei Bandeisen- und Röhrenstreifen liegt die Temperatur des letzten Stiches bisweilen unter 721°. In diesem Falle sollte man den Druck in den letzten Stichen möglichst gering, etwa 10%, halten, um ein kleines von Gleitlinien freies Korn zu erhalten.

C. Zusammenfassung.

Um den Zusammenhang zwischen Korngröße, Walztemperatur und Walzdruck zu ermitteln, wurden Stäbe und Uebergänge aus Krupp'schen Weicheisen gewalzt und untersucht, wobei folgende Ergebnisse erzielt wurden:

1. Die Ausgangskorngröße scheint auf den Verlauf der Rekristallisation nach dem Warmwalzen keinen Einfluß zu haben.

2. In der Mitte durchgewalzter Stäbe besteht die gleiche Abhängigkeit von Korngröße, Walzdruck und Walztemperatur, wie in der Mitte von Uebergängen.

3. Die Rekristallisation nach dem Warmwalzen verläuft gemäß dem Raumdiagramm der Abb. 5, S. 21.

4. Die Reibung zwischen Walze und Walzgut hindert die obersten Schichten an einem gleichmäßigen Fließen, sodaß

dadurch und durch die Verhältnisse an den Stabrändern, die ohne Gegendruck sind, im Walzkörper Zonen behinderter Verformung entstehen.

5. In der Rekristallisationskurve am Rande eines Ueberganges gemessen liegt der Schwellenwert bei einem geringeren prozentualen Druck als in der Mitte.

6. Die Lage des Schwellenwertes ist unabhängig von der Höhe des Ausgangsmaterials.

7. Die Rekristallisationskurve weist umso größere Werte der Korngröße auf, je größer bei gleichem Druck die Anfangshöhe war.

8. Die Zone der kritischen Verformung, bei der eine wesentliche Kornvergröberung eintritt, liegt bei den üblichen Walztemperaturen von 900° bis 1150° in der Mitte des Walzgutes zwischen 3% und 25% Druck.

Literaturverzeichnis.

1. **Hanemann und Hinzmann:** Stahl und Eisen, 1927, Nr. 40, S. 1651—1661.
2. **Moser:** Stahl und Eisen, 1923, Nr. 29, S. 935—42.
3. **Schüle:** Stahl und Eisen, 1922, Nr. 3, S. 90.
4. **Oberhoffer:** „Das technische Eisen", 1925, Verlag J. Springer, Berlin.
5. **Oberhoffer und Jungbluth:** Stahl und Eisen, 1922, Nr. 40, S. 1513—19.
6. **Rassow-Velde:** Zeitschrift für Metallkunde, 1920, S. 369.
7. **Czochralski:** „Moderne Metallkunde", 1924.
8. **Hanemann und Lucke:** Stahl und Eisen, 1925, Nr. 28, S. 1117—1122.
   S. auch Dissertation Lucke, Berlin 1925.
9. **W. Tafel:** „Walzen und Walzenkalibrieren", 1923, Verlag Wilhelm Ruhfus, Dortmund.
10. **Meyer und Nehl:** Stahl und Eisen, 1925, Nr. 48, S. 1961 bis 72.
11. **Fink:** Zeitschrift für das Berg-, Hütten- und Salinenwesen, 1874, S. 200—220.
12. **W. Tafel und G. Pajunk:** Stahl und Eisen, 1927, Nr. 38, S. 1562—65.
13. **Geuze:** Laminage du fer et de l'acier.
14. **Kirchberg:** „Grundzüge der Walzenkalibrierung", Dortmund, 1905.
15. **Falk:** Stahl und Eisen, 1910, Nr. 47, S. 1986—93.
16. **Sedlaczek:** Dissertation, Techn. Hochschule Breslau, 1924
17. **Siebel:** Archiv für das Eisenhüttenwesen, 1928, Heft 8, S. 543.
18. **W. Tafel und F. Anke:** Zeitschrift für Metallkunde, 1927, Heft 6, S. 225—31.
    S. auch Dissertation Anke, Breslau, 1927.
19. **Zay Jeffries:** Werkstoff-Ausschuß, Bericht Nr. 1.
20. **Polany:** Werkstoff-Ausschuß, Bericht Nr. 85.
21. **Masing:** Die Naturwissenschaften, 1923, Heft 22, S. 413 bis 22.
22. **Hanemann:** Werkstoff-Ausschuß, Bericht Nr. 84.
23. **Altpeter:** Stahl und Eisen, 1915, S. 362—73.
24. **Rosenhain:** Internationale Zeitschrift für Metallographie, 1914, S. 65—103.

Lebenslauf.

Als Sohn des Kontrollinspektors Gottlob Schneider wurde ich am 18. Dezember 1902 in Gleiwitz O.-S. geboren. Von Ostern 1909 bis Ostern 1913 besuchte ich die städtische Vorschule und trat Ostern 1913 in die Staatliche Oberrealschule in Gleiwitz ein, an der ich im Februar 1922 die Reifeprüfung bestand. Nach meiner praktischen Tätigkeit in Oberschlesien und im Rheinlande begann ich Oktober 1922 mit dem Studium der Eisenhüttenkunde an der Technischen Hochschule Breslau, an der ich im März 1927 meine Diplom-Hauptprüfung bestand.

Seit dem 1. April 1927 bin ich Assistent am Lehrstuhl für Hüttenmaschinen- und Walzwerkskunde der Technischen Hochschule Breslau.